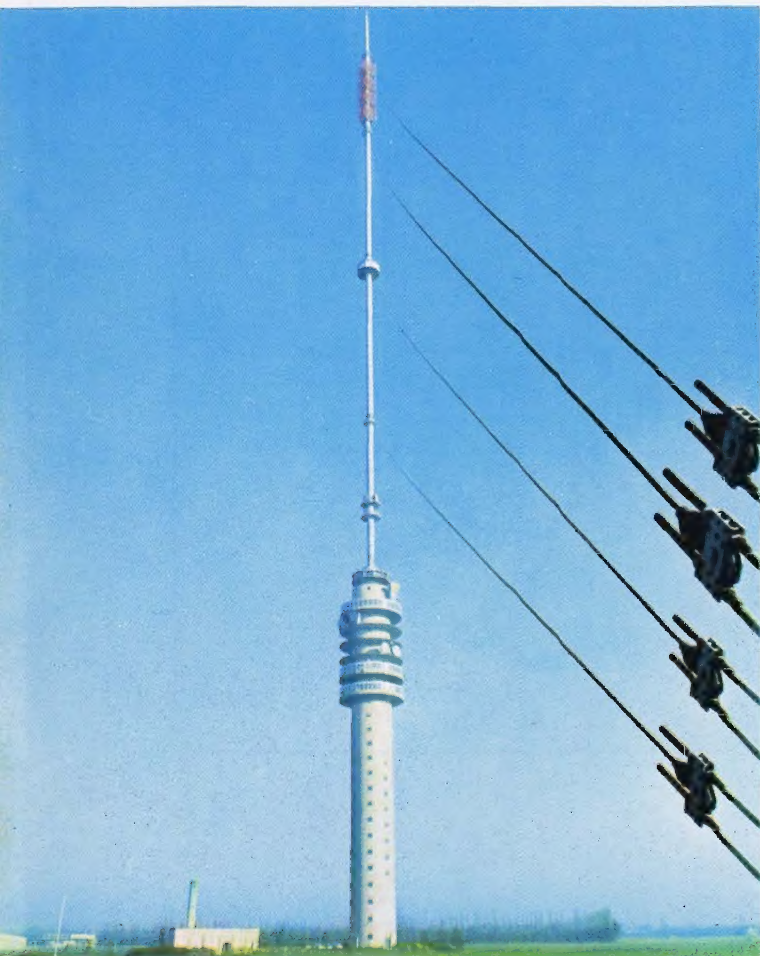
PHILIPS

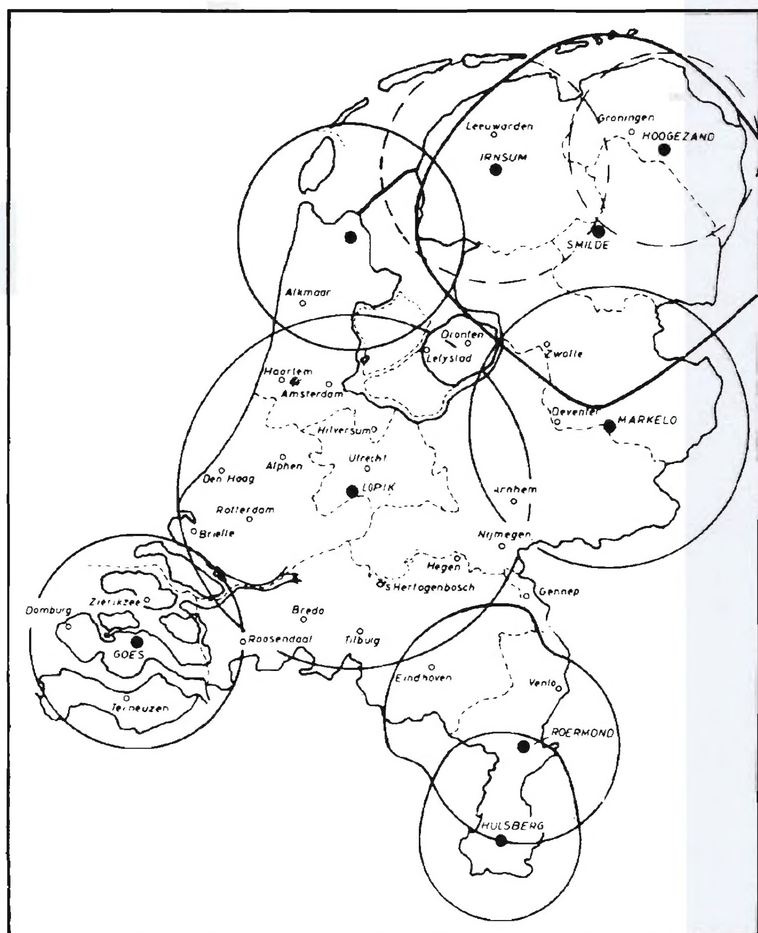
③

frequentiemodulatie



WIJ EN DE ELEKTRONICA

Het Nederlandse netwerk van zenders met frequentiemodulatie



← *Voor de FM-uitzendingen wordt gebruik gemaakt van de bekende hoge torens die in alle delen van het land staan*

FREQUENTIEMODULATIE

Zoals in het eerste deeltje van deze reeks werd verteld, kan de mens geluid waarnemen met frequenties tussen 20 en 20.000 Hz. Is het nu voor een ideale overdracht van bv. muziek nodig dit gehele gebied over te brengen? Om deze vraag te kunnen beantwoorden, moeten wij eerst wat meer weten over het geluid zelf.

Geluid: toon en klank

Slaan we een a-stemvork aan, dan zal iedere musicus aan de hoogte van de toon direct de „a" herkennen. Vrijwel iedereen zal ook kunnen vaststellen dat de geluidsbron een stemvork was, daarbij afgaande op de klank of het timbre. De frequentie van deze toon is internationaal genormaliseerd op 440 Hz. Het bijzondere van de toon van een stemvork is, dat het een nagenoeg zuivere trilling is: er zijn geen andere frequenties in aanwezig.

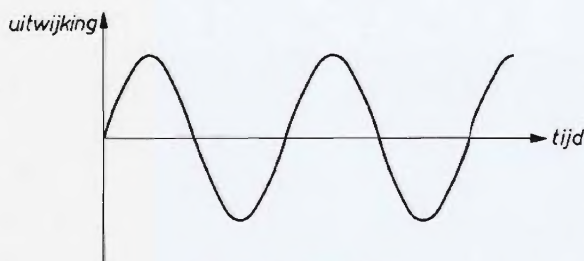


Fig. 1. Een zuivere trilling

Slaan we nu op de piano de „a" aan, dan horen we dezelfde toon van 440 Hz, doch iedereen zal aan de klank kunnen vaststellen dat het nu een piano is. Dezelfde toon heeft een andere klank. Zo'n pianotoon heeft nl. behalve een zuivere trilling van 440 Hz nog een aantal hogere tonen, boventonen of harmonischen genaamd. De frequenties van deze tonen, op zich zelf ook zuivere trillingen, zijn veelvouden van die

van de grondtoon. Voor het gemak wordt de grondtoon wel de eerste harmonische genoemd; de tweede harmonische heeft dus een frequentie van 2 × 440 = 880 Hz, de derde 3 × 440 = 1320 Hz, enz.
De klank of het timbre van een muziektoon wordt nu bepaald door het aantal boventonen en door de onderlinge sterkteverhoudingen. Deze lopen bij de verschillende instrumenten sterk uiteen, zodat elk zijn eigen kenmerkende klank heeft.
In figuur 2 zijn als voorbeeld getekend een grondtoon, de tweede en de derde harmonische met achtereenvolgens kleinere amplitudo (grootste trillingsuitwijking), dus kleinere sterkte. Combinatie van deze drie zuivere trillingen geeft een samengestelde trilling van de als laatste getekende vorm. Bereikt zo'n trilling ons oor, dan horen we een geluid met dezelfde toonhoogte als de grondtoon, doch met een andere klank. Omgekeerd kan elk denkbaar geluid ontleed worden in een of meer grondtonen en hun harmonischen. Ook gesproken klinkers en medeklinkers kunnen we in een aantal zuivere, enkelvoudige trillingen ontleden. Van enkele, zoals bv. de s en de f zijn de lagere harmonischen praktisch aan elkaar gelijk; het verschil is voornamelijk gelegen in de hoge harmonischen, dus in de hoge frequenties.
Bij de telefonie volstaat men met het overbrengen van de frequentieband tussen ca 200 en 4000 Hz. De verstaanbaarheid van spraak wordt door deze beperking nauwelijks beïnvloed.

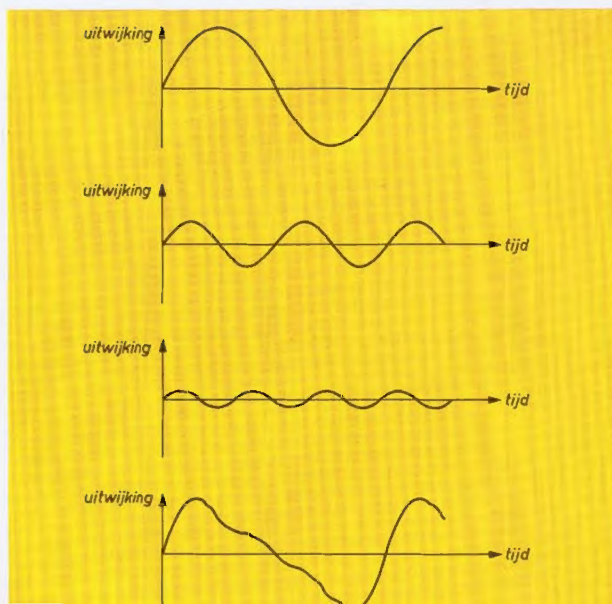


Fig. 2. Samengestelde trilling

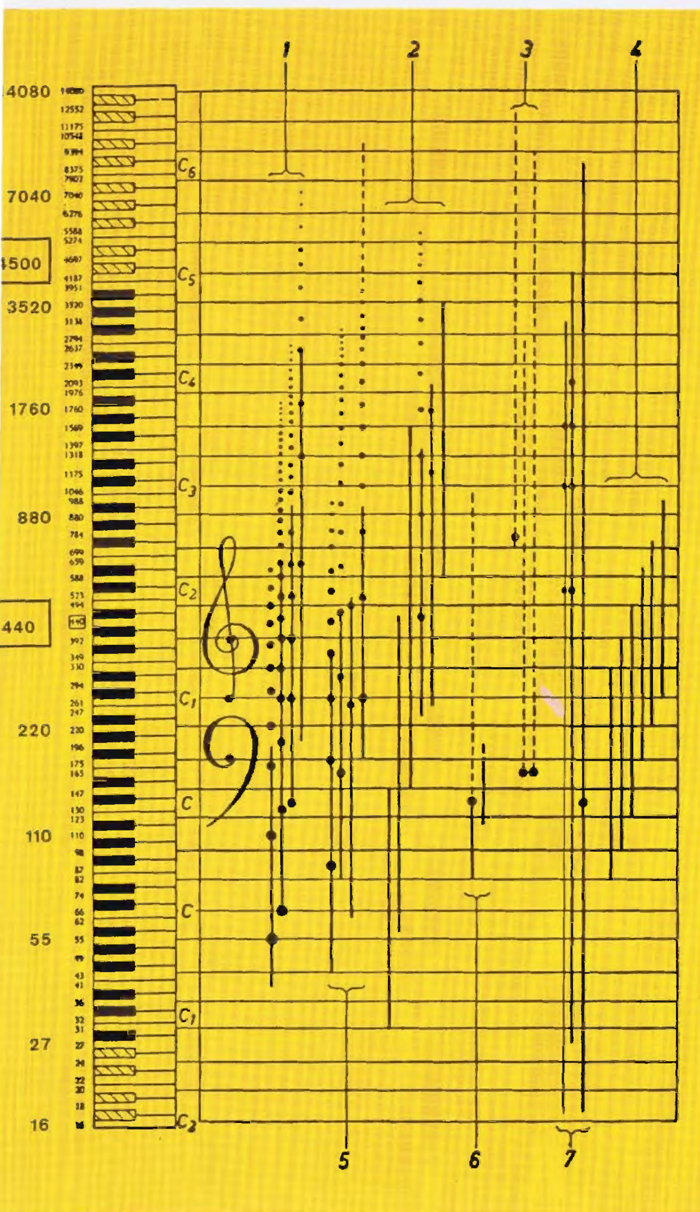


Fig. 3. Overzicht van de toonomvang van verschillende instrumenten en stemmen

1. (v.l.n.r.):
   Contrabas
   Violoncello
   Altviool
   Violino

2. Contrafagot
   Fagot
   Clarinet
   Hobo
   Fluit
   Piccolo

3. Triangel
   Bekken op bekken
   Geslagen bekken

4. Bas
   Bariton
   Tenor
   Alt
   Mezzo-sopraan
   Sopraan

5. Tuba
   Trombone
   Hoorn
   Trompet

6. Grote pauk
   Kleine pauk

7. Harp
   Vleugel
   Orgel

Bij de muziekinstrumenten waarvan de grondtonen bijna steeds ruim onder de 4000 Hz liggen, komen de verschillen in timbre meestal pas tot uiting door de hogere harmonischen. Om hier een enigszins natuurlijk klinkende weergave te krijgen, moeten dus ook de hogere harmonischen d.w.z. ook de hoge frequenties overgebracht worden. In het telefoonnet is een beperkt aantal lijnen speciaal hiervoor ingericht.
In figuur 3 is de toonomvang van een aantal muziekinstrumenten en stemmen aangegeven. De dikgetrokken lijn stelt het frequentiegebied van de grondtonen voor, die dus de toonhoogte bepalen. Bij een aantal van deze instrumenten zijn van een bepaalde noot de grondtoon en de bijbehorende harmonischen aangegeven door dikke punten en stippellijnen.
Het zal duidelijk zijn dat een weergave, die zoals dat bij onze normale radio-uitzendingen het geval is, niet hoger komt dan 4500 Hz, nog verre van natuurlijk is, omdat zeer veel harmonischen en zelfs wel grondtonen niet worden weergegeven.
De vraag is nu: waarom beperkt men zich bij deze uitzendingen tot een frequentie van hoogstens 4500 Hz? Het is technisch gemakkelijk tot zo nodig 15.000 of 20.000 Hz te gaan. Aangenomen dat ook de ontvangtoestellen deze hogere tonen goed weergeven, zou dan een ideale situatie verkregen zijn. Het antwoord op deze vraag ligt echter op ander terrein.

Bandbreedte

In het eerste deeltje (blz. 12) is uiteengezet hoe men bij de radio gebruik maakt van een draaggolf met een vaste, hoge frequentie. Het blijkt dat, zodra men zo'n draaggolf met geluid moduleert, de draaggolffrequentie een zekere spreiding vertoont. Op de verklaring kunnen we hier niet ingaan. Er wordt nu een frequentieband ingenomen, waarvan de breedte bepaald wordt door de toonomvang van het over te brengen geluid. Is bv. de draaggolffrequentie 1 MHz overeenkomende

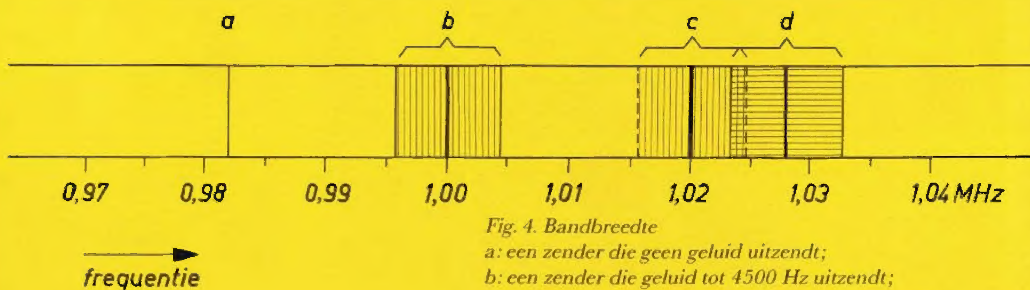


Fig. 4. Bandbreedte
a: een zender die geen geluid uitzendt;
b: een zender die geluid tot 4500 Hz uitzendt;
c en d: twee zenders die elkaar bij ontvangst storen

met een golflengte van 300 m en bevat het geluid alle frequenties tot bv. 5000 Hz, dan zijn de grenzen van de „draagfrequentieband" 1 MHz — 5000 Hz = 0,995 MHz en 1 MHz + 5000 Hz = 1,005 MHz. De breedte van deze band is 10.000 Hz = 10 kHz, dus het dubbele van de hoogste frequentie die in het geluid voorkomt. Voor het overbrengen van een geluidsgebied van 10 kHz is de bandbreedte dus 20 kHz, en voor 15 kHz zelfs 30 kHz.

Willen twee zenders vrij van elkaar ontvangen kunnen worden, dan moeten hun draaggolffrequenties dus minstens een verschil hebben gelijk aan de bandbreedte. Als er nu slechts enkele zenders waren, zou er geen probleem zijn. Er is echter een waar gedrang in de ether: de draaggolffrequenties kwamen zo dicht bij elkaar, dat de zenders elkaar bij de ontvangst gingen storen. En dat lag niet aan de ontvangtoestellen! Daarom heeft men op internationale conferenties getracht hier orde op zaken te stellen. Zo zijn aan ieder land een aantal frequenties toegewezen waarop zijn omroepzenders mogen werken. Bovendien is de bandbreedte voor elke zender op maximaal 9 kHz gesteld. Dit houdt in, dat de hoogste over te brengen geluidsfrequentie 4500 Hz bedraagt. Dat is dus de reden dat men ten aanzien van de geluidskwaliteit met een compromis genoegen moet nemen.

Het frequentiegebied dat voor radio-omroep wordt gebruikt, is onderverdeeld in vijf gebieden, waarvan de grenzen niet nauwkeurig vastliggen. Voor ons doel kunnen de volgende grenzen worden aangenomen:

langegolven:	2000—560 m	(150— 540 kHz)
middengolven:	560—160 m	(540— 1900 kHz)
kortegolven I:	160— 45 m	(1900— 6700 kHz)
kortegolven II:	45— 13 m	(6700—23000 kHz)

ultrakortegolven: onder 13m (boven 23.000kHz=23MHz).

In het middengolfgebied kunnen dus bij een bandbreedte van 9 kHz (1900—540) : 9 = 151 zenders worden ondergebracht. Bij een bandbreedte van 10 kHz (hoogste geluidsfrequentie 5000 Hz) wordt dat 136 zenders, bij 20 kHz (hoogste





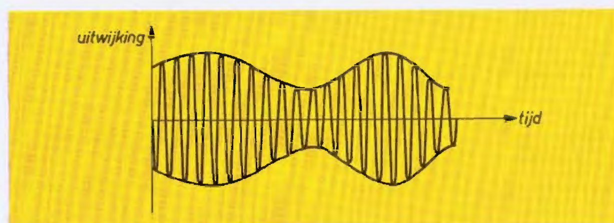


Fig. 5. Amplitudomodulatie

geluidsfrequentie 10 kHz) zijn het er 1360 : 20=68 en bij 30 kHz (hoogste geluidsfrequentie 15 kHz) slechts 45! In het golflengtegebied van 13—45 m (23.000 kHz—6700 kHz) zijn deze aantallen respectievelijk 1810, 1640, 820 en 546. In het kortegolfgebied kunnen dus aanmerkelijk meer zenders werken dan in het middengolfgebied. Maar niettegenstaande het feit dat de bandbreedte slechts tot 9 kHz (hoogste geluidsfrequentie 4500 Hz) is beperkt, is er door het grote aantal omroepzenders op de populaire middengolf toch letterlijk sprake van een gedrang in de ether. Dit heeft tot gevolg, dat bij de ontvangst vele zenders elkaar storen, temeer daar de ontvangers gevoeliger geworden zijn. Daar in het ultrakortegolfgebied zeer vele zenders, zelfs bij een grote bandbreedte, kunnen worden ondergebracht, is men steeds meer van deze korte golven gebruik gaan maken, waarbij dan zonder veel bezwaar de bandbreedte kon worden vergroot, dus de kwaliteit opgevoerd. Dit laatste stelde natuurlijk weer hogere eisen aan de ontvanger. De kwaliteit van de geluidsoverdracht is zodoende aanmerkelijk verbeterd. Toch was er nog geen reden om geheel voldaan te zijn. De storingen t.g.v. elektrische atmosferische verschijnselen werden juist door de technische verbeteringen als extra hinderlijk ondervonden. En zo ging men zoeken naar andere wegen.

Tot nu toe hebben we aangenomen dat bij de besproken radiouitzendingen alleen gebruik gemaakt werd van de zg. amplitudomodulatie, kortweg AM genoemd. Zoals in het eerste deeltje is besproken, wordt hierin de trillingssterkte van de draaggolf gevarieerd in het tempo van de relatief veel langzamere geluidstrilling. De grootte van de amplitudo van de draaggolf verandert zodanig, dat de lijn die we langs de toppen van de gemoduleerde draaggolftrilling kunnen trekken, overeenkomt met de lijn die de geluidstrilling voorstelt (zie fig. 5). De frequentie van de draaggolf verandert echter niet.

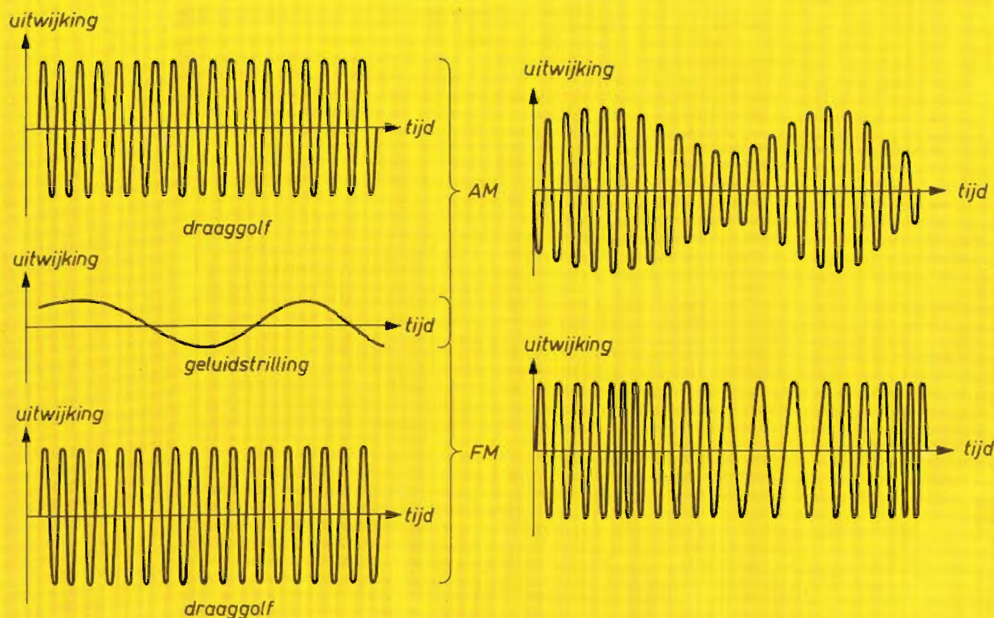
Atmosferische storingen veroorzaken in deze draaggolf ook variaties in de amplitudo. Het ontvangtoestel dat deze ver-

vormde trillingen ontvangt, is niet in staat onderscheid te maken tussen uitgezonden geluid en storing en geeft dus de storing zonder meer door, zulks tot ergernis van de luisteraar.

Frequentiemodulatie

Reeds sedert 1920 is er nog een andere modulatiemethode, nl. die waarbij niet de amplitudo, maar de frequentie van de draaggolf gevarieerd wordt in het ritme van het over te brengen geluid. Terwijl bij de amplitudomodulatie (AM) de frequentie van de draaggolf constant blijft en de amplitudo varieert, is bij de zg. frequentiemodulatie (FM) de amplitudo constant en varieert de frequentie. Het verschil kan het best in een tekening tot uiting worden gebracht (fig. 6).
Het heeft tot 1934 geduurd eer de Amerikaan E. H. Lawrence aantoonde, dat met FM betere resultaten bereikt kunnen worden, doordat deze aanmerkelijk minder last ondervindt van storingen. Wel heeft echter de FM een relatief grotere bandbreedte nodig dan de AM, zelfs bij dezelfde toonomvang. Daardoor was men met de FM wel gedwongen die golfgebieden te gebruiken waar voldoende ruimte beschikbaar was: de korte golven. Dat FM en korte golven samen-

Fig. 6. AM en FM



gaan is dus een gevolg van praktische, niet van principiële redenen. Als er ruimte genoeg was, zou FM ook op de langere golven met succes kunnen worden gebruikt.
Eerst omstreeks 1950 waren er in Europa zoveel FM-zenders in bedrijf, dat het voor de fabrikanten de moeite en kosten loonde ook de mogelijkheid tot het ontvangen van deze zenders in hun toestellen in te bouwen. Vooral in Duitsland, dat na de tweede wereldoorlog slechts weinig ruimte in de middengolf kreeg toegewezen, ontwikkelde zich deze techniek snel. Ook in het grootste deel van Nederland kunnen thans o.m. de programma's van Hilversum met FM worden ontvangen. De geluidsomvang is 12 kHz, waarbij een bandbreedte van ca 200 kHz wordt ingenomen. De draaggolffrequentie is ongeveer 100 MHz, overeenkomende met een golflengte van ca 3 m.

De ontvanger

De werking van een FM-ontvanger is veel moeilijker te begrijpen dan die van een AM-ontvanger. Wij zullen er daarom mee volstaan alleen in zeer grote lijnen aan te geven wat er in een FM-ontvanger gebeurt. De FM-draaggolf waarop is afgestemd, veroorzaakt, net als bij AM, een met deze gemoduleerde draaggolf overeenkomende elektrische trilling in de antennekring van de ontvanger.
De draaggolf bevat echter niet alleen het over te brengen signaal (muziek bv.), doch zij is op haar weg van zender naar ontvanger ook nog beïnvloed door storingen van bv. atmosferische oorsprong. Deze storingen moduleren de draaggolf in amplitudo, waardoor dus bij FM de amplitudo niet constant blijft, doch pieken gaat vertonen. Deze storingen komen dus ook voor in de elektrische trilling in de antennekring van de FM-ontvanger. Deze trilling wordt nu toegevoerd aan een versterkbuis, ook wel „begrenzer" genoemd. De eventueel

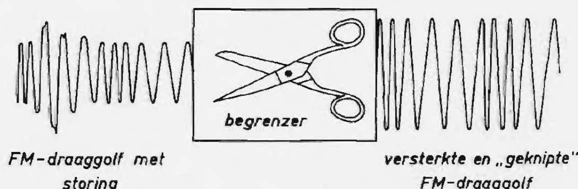


Fig. 7. Ontstoring door de begrenzer

aanwezige stoorsignalen worden hierin „weggesneden" en het overblijvende „ontstoorde" signaal wordt versterkt (zie fig. 7). De zo verkregen grote storingvrijheid is het belangrijke voordeel van FM. Bij AM kunnen deze storingen nl. niet worden „weggesneden", omdat men daarbij tevens de geluidsmodulatie zou aantasten.
Het versterkte signaal wordt nu toegevoerd aan een demodulator, waarin de frequentievariaties van de draaggolf worden omgezet in elektrische trillingen die overeenkomen met de geluidstrillingen. De werking van deze demodulator is te ingewikkeld om hier te worden verklaard.
De elektrische geluidstrilling die na demodulatie beschikbaar komt, wordt nu, evenals dat bij AM het geval is, versterkt en dan aan de luidspreker toegevoerd. Aangezien, dank zij de grotere toonomvang, de kwaliteit van het via FM-zenders overgebrachte geluid aanmerkelijk beter is dan die bij AM, moeten zowel de versterkers in de ontvanger als de luidspreker aan veel hogere eisen voldoen om deze betere kwaliteit tot haar recht te laten komen.
We zouden wat de FM betreft, met het bovenstaande kunnen volstaan, ware het niet dat door het gebruik van korte golven nog enkele bijzondere verschijnselen optreden, zowel bij AM als bij FM.

Voortplanting van radiogolven

Reeds spoedig na de ontdekking van de radio werd geconstateerd, dat radiogolven met lage frequentie, dus lange golflengte, met het aardoppervlak mee buigen. Daardoor is ontvangst op grote afstand achter de horizon mogelijk. Zelfs bergen vormen geen beletsel.
Korte golven volgen echter van de zender uit rechte lijnen. De uitgestraalde golven worden voor een groot deel tegen bepaalde, elektrisch geladen lagen hoog in de atmosfeer gereflecteerd. Deze gereflecteerde golven bereiken de aarde weer op zeer grote afstand van de zender. Herhaalde reflecties tegen deze lagen en de aarde zijn daarna nog mogelijk. Dit is de reden dat met korte golven enorm grote afstanden kunnen worden overbrugd: niet door directe, maar door gereflecteerde straling.
De zeer korte golven (korter dan ca 10 m) echter dringen door deze lagen heen en komen dus niet op de aarde terug. Goede ontvangst van deze zeer korte „metergolven" is dan



Fig. 8. Zenderbereik voor ultrakorte golven

ook alleen daar te verwachten waar men de zendantenne kan zien.

Alleen de directe straling bereikt normaal de ontvangantenne. Deze korte golven gedragen zich nl. als lichtgolven. Het zal duidelijk zijn, dat het gebied dat door de zender wordt bestreken, groter is naarmate de zendantenne hoger is opgesteld. Berekening leert dat voor een plaats op 13 m hoogte de horizon op 13 km afstand ligt, voor 52 m hoogte op 26 km en voor 208 m hoogte op 52 km. Stelt men de hoogte in meters voor door h dan is de gezichtseinder op een afstand van $\sqrt{13h}$ km gelegen.

Fig. 9.



Ontvangst op nog grotere afstand is natuurlijk mogelijk door ook de ontvangantenne hoog boven het aardoppervlak te plaatsen. De overbrugbare afstand is te berekenen door zowel van de zendantenne als van de ontvangantenne de horizonsafstand te bepalen en de twee uitkomsten op te tellen (fig. 9).
Opgemerkt moet worden dat door speciale atmosferische omstandigheden ontvangst over aanzienlijk grotere afstanden dan bovengenoemd mogelijk is gebleken. Deze situatie behoort echter tot de grote uitzonderingen.

Doordat een met korte golven werkende FM-zender een beperkte reikwijdte heeft, zal van een aantal verspreid opgestelde zenders gebruik gemaakt moeten worden, wil men een bepaald radioprogramma over een geheel land uitzenden. Voor elke zender is vanzelfsprekend slechts een vrij kleine zendenergie nodig.
Voor in dit boekje is een kaartje opgenomen van het Nederlandse zendernet. De FM-zenders in Lopik, Hoogezand, Irnsum, Smilde, Markelo, Roermond, Hulsberg, Goes en Middenmeer zijn hierin aangegeven.
Het spreekt vanzelf dat de aanwezigheid van lokale zenders afzonderlijke, regionaal gerichte programma's mogelijk maakt.

FM-kortegolfantennes

Woont men niet te ver van een FM-kortegolfzender af, dan is de ontvangst daarvan met een normale antenne mogelijk. Wil men echter ook verderaf gelegen zenders ontvangen, dan moet daarvoor een speciale antenne worden gebruikt. In tegenstelling tot de normale antenne zijn de speciale kortegolfantennes voor signalen uit de ene richting gevoeliger dan voor andere richtingen. Ze hebben dus richtinggevoeligheid. Verder vertonen ze — afhankelijk van hun afmetingen — een voorkeur voor een bepaald frequentiegebied. Ze zijn dus als het ware reeds op een speciaal golflengtegebied afgestemd. Het voordeel van deze richtinggevoeligheid en afstemming is, dat één of meer zenders sterker worden ontvangen, terwijl men minder last heeft van andere (storende) zendersignalen.
De lengte van de antenne — in de regel is het een metalen staaf — is gelijk aan de helft van de te ontvangen golflengte. Deze afstemming is echter niet scherp, zodat het mogelijk is

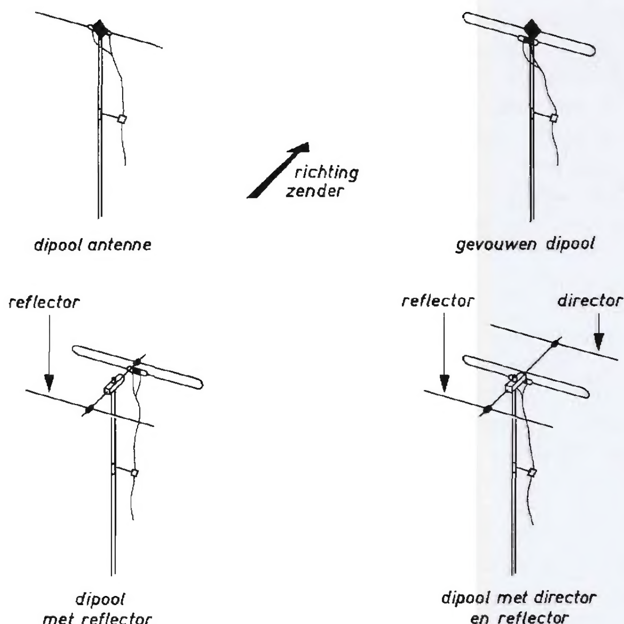


Fig. 10. Verschillende uitvoeringen van FM-kortegolfantennes

met een dergelijke antenne verschillende zenders waarvan de golflengten niet te ver uiteen liggen, te ontvangen.
De enkele antennestaaf kan worden dubbel gevouwen, terwijl het ook mogelijk is het richteffect en de gevoeligheid van de antenne te vergroten. Men brengt daartoe staven aan die op bepaalde afstand evenwijdig met de antenne lopen, z.g. directors en reflectors.
Daar ook televisie van korte golven gebruik maakt, worden voor dit doel eveneens dergelijke afgestemde antennes toegepast.
Hiermede zijn de voornaamste punten betreffende de frequentiemodulatie besproken. Wij hebben gezien hoe pogingen gericht op verbetering van de geluidskwaliteit van radiouitzendingen bij herhaling geleid hebben tot nieuwe methoden. Dergelijke ontwikkelingen komen in de elektronica telkens voor en maken het een fascinerend stuk van wetenschap en techniek.

Woorden en begrippen

PHILIPS' NEDERLAND N.V. – EINDHOVEN
AFD. ONDERWIJSVOORLICHTING